

Bestandsaktualisierung von 3D-Stadtmodellen durch Analyse von 3D-Punktwolken

RICO RICHTER¹ & JÜRGEN DÖLLNER²

In dieser Arbeit wird ein Verfahren zur Fortführung und Aktualisierung virtueller 3D-Stadtmodelle auf Basis automatischer Auswertung von LiDAR-Daten vorgestellt. Scanner-Technologien (z. B. LiDAR) ermöglichen die regelmäßige und kosteneffiziente Erfassung von Städten und Metropolregionen durch Befliegungen oder terrestrische Aufnahmen. Die Konstruktion eines 3D-Stadtmodells ist hingegen im Allgemeinen aufwändig, so dass die Aktualisierung eines bereits bestehenden 3D-Stadtmodells aus wirtschaftlicher Sicht effizienter durchgeführt werden muss. Mit dem hier vorgestellten Verfahren ist es möglich, bestehende 3D-Stadtmodelle und erfasste LiDAR-Daten in Echtzeit zu visualisieren und Veränderungen im Datenbestand automatisiert zu ermitteln. Unterschiede zwischen der tatsächlichen Bebauung und des im 3D-Stadtmodell vorhandenen Datenbestandes werden so zuverlässig erkannt, so dass eine nachfolgende manuelle Bestandsaktualisierung durch 3D-Stadtmodellwerkzeuge fokussiert durchgeführt werden kann.

1 Einleitung

Die Erfassung von 3D-Daten durch z. B. LiDAR-Befliegungen wird zunehmend in regelmäßigen Abständen durchgeführt. Die resultierenden 3D-Punktwolken eignen sich aufgrund der hohen Abtastdichte und Genauigkeit für eine Bestandsaufnahme der aktuellen Bebauung und Struktur von Städten und Metropolregionen. In der Regel liegen bereits Fernerkundungsdaten aus vorherigen Erfassungen im Datenbestand vor, welche für die Aufbereitung und Konstruktion von geovirtuellen Umgebungen (GeoVEs) verwendet wurden (GRÖGER 2009). Da die Konstruktion eines 3D-Stadtmodells im Allgemeinen aufwändig ist und die Einbeziehung zahlreiche Datenquellen erfordert, ist eine Rekonstruktion des gesamten Modells auf Basis der neu erfassten 3D-Punktwolken im Hinblick auf Zeit und Kosten unwirtschaftlich. Es ist wirtschaftlich und verfahrenstechnisch hingegen effizienter nur solche Gebiete zu überarbeiten, in denen Veränderungen vorliegen, zumal sich Bebauung und Struktur in der Regel nur lokal begrenzt und zeitlich vereinzelt ändern. Die Aktualisierung und damit Fortführung wird mehr und mehr als eine entscheidende Grundaufgabe im nachhaltigen Management von GeoVEs und insbesondere 3D-Stadtmodellen betrachtet.

Im Kontext der LiDAR-basierten Datenerfassung stellt die Aufbereitung, Speicherung und Verarbeitung von massiven 3D-Punktwolken eine softwaretechnische und computergrafische Herausforderung dar. Eine zentrale Frage aus der Anwendungsperspektive besteht darin, ob der durch die LiDAR-Daten repräsentierte Ist-Zustand dem bereits vorliegenden Zustand des 3D-Stadtmodells entspricht bzw. wo hierbei Unterschiede vorzufinden sind. Die für den Nutzer interessanten Unterschiede entstehen im Allgemeinen durch bauliche Veränderungen. Bauwerke im 3D-Stadtmodell, welche nicht mehr in einer aktuellen 3D-Punktwolke enthalten sind, wurden in der Regel abgerissen und müssen aus dem 3D-Stadtmodell entfernt werden. Umgebaute oder neu entstandene Bauwerke, die in der 3D-Punktwolke erkannt werden, müssen zu dem 3D-Stadtmodell hinzugefügt werden.

1) Rico Richter, Hasso-Plattner-Institut, Universität Potsdam; E-Mail: rico.richter@hpi.uni-potsdam.de

2) Jürgen Döllner, Hasso-Plattner-Institut, Universität Potsdam; E-Mail: doellner@hpi.uni-potsdam.de

2 Aufbereitung von 3D-Stadtmodellen

Digitale 3D-Stadtmodelle sind weit verbreitet und werden beispielsweise zur Städteplanung, Katastrophensimulation und Datenvisualisierung eingesetzt. Das Erzeugen von detaillierten und qualitativ hochwertigen 3D-Stadtmodellen setzt eine aufwändige Aufbereitung mit verschiedenen 3D-Stadtmodellwerkzeugen voraus, welche zahlreiche Datenquellen (z. B. Luftbilder, Schrägluftbilder, Geländemodelle, 3D-Punktwolken und Bauwerksgrundrisse) benötigen. Um den manuellen Aufwand für die Konstruktion eines 3D-Stadtmodells zu verringern, werden die benötigten Daten weitgehend automatisiert erfasst, aufbereitet und verarbeitet (HU 2006). Wichtige Kriterien für die Qualität eines 3D-Stadtmodells sind die Genauigkeit, Vollständigkeit und Korrektheit der 3D-Geometrie, welche der tatsächlichen Bebauung einer durch das 3D-Stadtmodell repräsentierten Region entspricht.

Um die Bauwerksgeometrien eines 3D-Stadtmodells zu rekonstruieren, werden 3D-Punktwolken aus LiDAR-Befliegungen verwendet, welche ein exaktes Abbild der erfassten Region liefern (AMERI 2000, ZHOU 2008, LAFARGE 2010). In Kombination mit vorhandenen Bauwerksgrundrissen und durch das Erkennen von Strukturen (VOSSELMAN 2004, DORNINGER 2007) können 3D-Gebäuderekonstruktionsprogramme detaillierte Bauwerksmodelle aus 3D-Punktwolken generieren. Des Weiteren werden aus 3D-Punktwolken digitale Geländemodelle (DGM), Oberflächenmodelle (Digital Surface Modell, DSM) sowie Bauwerksstandorte abgeleitet (CHENG 2008).

Die Texturierung von Geländemodellen erfolgt durch die Verwendung von Luft- und Satellitenbildern (TANNER 1998, DÖLLNER 2000) sowie Schrägluftbildern für Fassaden von Bauwerken (FRUEH 2004).

3 Aktualisierung von 3D-Stadtmodellen

Durch LiDAR-Befliegungen werden in regelmäßigen Abständen Städte und Regionen flächendeckend digital erfasst. Neu erfasste LiDAR-Daten repräsentieren den Ist-Zustand der Bebauung und sollen möglichst effizient in den bereits vorhandenen Datenbestand sowie daraus abgeleitete GeoVEs integriert werden. Aufgrund von lokal begrenzt auftretenden baulichen Veränderungen ist in der Regel nur eine punktuelle Aktualisierung und Rekonstruktion des 3D-Stadtmodells erforderlich.

Die zentrale Fragestellung besteht darin, welche Bauwerke im 3D-Stadtmodell aufgrund baulicher Veränderungen aktualisiert werden müssen. Die baulichen Veränderungen und damit verbundenen Anpassungen im Datenbestand des 3D-Stadtmodells lassen sich in drei Kategorien einteilen.

- Entfernen von abgerissenen Bauwerken
- Anpassen von veränderten Bauwerken
- Hinzufügen von neu entstandenen Bauwerken

Die erfassten Daten zeichnen sich besonders durch ihre Massivität aus, da bei LiDAR-Befliegungen oft mehrere hundert Gigabyte Daten erzeugt werden. Die Algorithmen für das Auffinden von Veränderungen müssen deshalb im Hinblick auf die benötigte Rechenzeit effizient arbeiten, um die Analyse großer Datenmengen durchführen zu können.

3.1 Auffinden von veränderten Bauwerken

Um baulich veränderte und abgerissene Bauwerke zu finden, wird die aus den LiDAR-Daten gewonnene 3D-Punktwolke mit den im Datenbestand vorhandenen Bauwerksgrundrissen verglichen. Für jeden Grundriss werden alle Punkte, die sich auf bzw. über dem Grundriss befinden, ermittelt. Dabei können sowohl ungeordnete Punkte aus LiDAR-Daten, als auch rasterisierte Punkte aus einem abgeleiteten Oberflächenmodell (DSM) verwendet werden. Für diese Punkte wird die Höhendifferenz zum bereits vorhandenen digitalen 3D-Geländemodell (DGM) gebildet. Folglich lässt sich die aktuelle Höhe des Bauwerkes, welches durch den Grundriss in seiner Lage beschrieben ist, aus den LiDAR-Daten ableiten. Diese Höhe wird mit der Bauwerkshöhe des im Datenbestand vorhandenen Modells abgeglichen. Stimmen beide Höhen überein (Abb. 1 (a)), ist das Bauwerksmodell im Datenbestand aktuell. Stimmen sie nicht überein, sind Rückschlüsse auf bauliche Veränderungen oder einen Abriss des Bauwerkes zu ziehen. Ein geringer Höhenunterschied zwischen dem DGM und dem Ausschnitt aus der 3D-Punktwolke deuten auf ein abgerissenes Bauwerk hin (Abb. 1 (c)). Liegt die Punktmenge signifikant über dem DGM, stimmt jedoch nicht mit der Bauwerkshöhe im Datenbestand überein, lassen sich Rückschlüsse auf bauliche Veränderungen ziehen (Abb. 1 (b)). Alle Grundrisse im Datenbestand, welche nicht die gewünschte Übereinstimmung mit den neu erfassten LiDAR-Daten haben, werden so erfasst und dargestellt.

Die Visualisierung der erkannten Bauwerke erfolgt im Gesamtkontext des vorhandenen Datenbestandes und kann durch den Nutzer individuell konfiguriert werden. Abbildung 2 (a) zeigt die 3D-Punktwolke und Bauwerksgrundrisse für die zu analysierende Region. Optional können auch Luftbilder und das DGM dargestellt werden. In Abb. 2 (b) ist die reduzierte 3D-Punktwolke dargestellt, die für die Berechnung verwendet wird. Die Parameter und Grenzwerte für das Klassifizieren von veränderten Bauwerken können interaktiv angepasst werden, so dass alle Bauwerke mit unzureichender Übereinstimmung gegenüber dem Datenbestand hervorgehoben werden (Abb. 2 (c)).

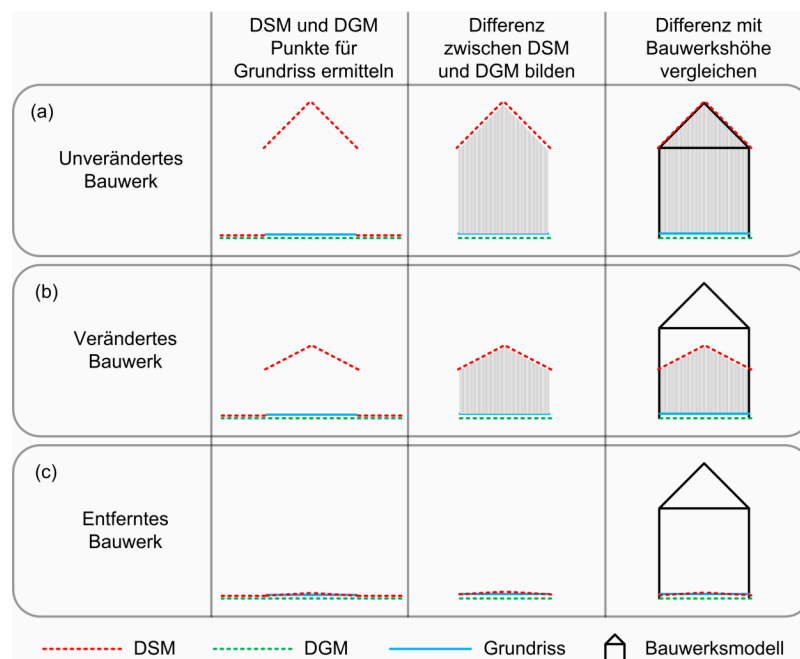


Abb 1: Schematische Darstellung zum Auffinden von baulich veränderten Bauwerken



Abb. 2: Darstellung der Ergebnisse beim Auffinden von Bauwerken mit Veränderungen.

3.2 Auffinden von neuen Bauwerken

Das Auffinden von Bauwerken, welche nicht durch das 3D-Stadmodell repräsentiert werden, ist aufwändiger als das Finden von veränderten Bauwerken. Der Grund dafür ist die Größe der zu analysierenden LiDAR-Daten, die nicht auf die Bereiche der bereits vorhandenen Bauwerksgrundrisse eingeschränkt werden können.

Beim Auffinden von neuen Bauwerken werden die gesamten LiDAR-Daten oder das daraus abgeleitete DSM mit dem Geländemodell (DGM) aus dem Datenbestand abgeglichen, indem die Höhendifferenz gebildet wird. Dieser Abgleich ermöglicht eine Verringerung der zu untersuchenden Datenmenge, da alle Punkte, die nicht oder nur geringfügig oberhalb des DGMs liegen, Bodenpunkte sind und in der Regel keine Bauwerke darstellen. Abbildung 3 (a) skizziert diesen Vorgang, bei dem nur die Punkte der 3D-Punktwolke mit einer Mindesthöhe gegenüber dem DGM verarbeitet werden.

Bauwerke heben sich durch planare Flächen von Vegetation ab. Diese Flächen werden innerhalb der 3D-Punktwolke gesucht, indem die Lage jedes Punktes zu räumlich angrenzenden Punkten analysiert wird. Alle benachbarten Punkte die in einer Ebene liegen werden gruppiert. Aus diesen Punktgruppen lassen sich Umrisspolygone ableiten, die in der Regel ab einer Mindestgröße die Dachflächen eines Bauwerkes repräsentieren. Dicht beieinander liegende Umrisspolygone mit gemeinsamen Kanten gehören in der Regel zu einem Dach, so dass ein Gesamtpolygon mit dem dazugehörigen Grundriss abgeleitet werden kann (Abb. 3(b)).

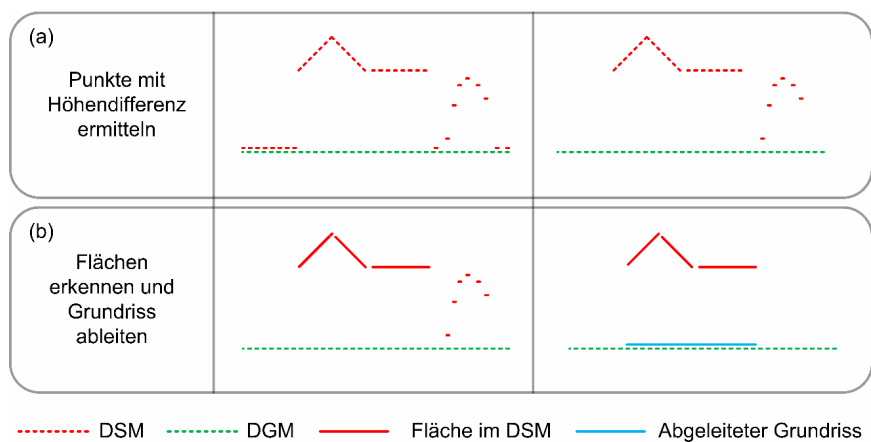


Abb. 3: Schematische Darstellung zum Auffinden von Bauwerksgrundrissen in 3D-Punktwolken

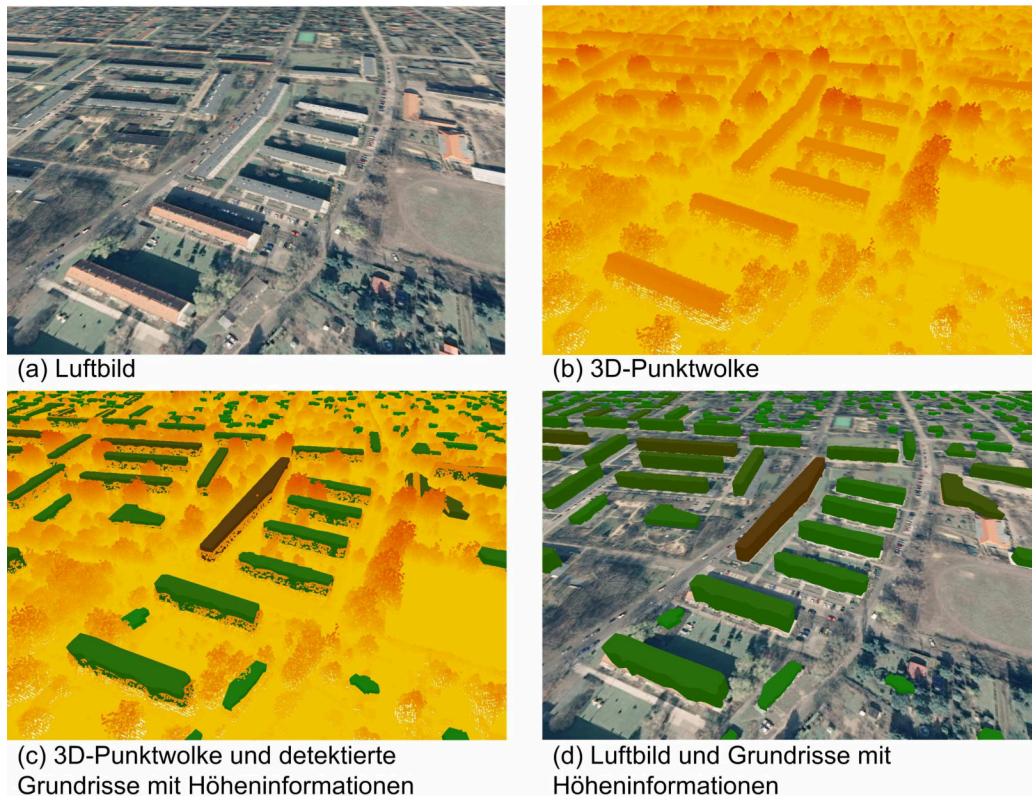


Abb. 4: Darstellung der Ergebnisse beim Auffinden von Bauwerksgrundrissen in 3D-Punktwolken

Die Ergebnisse des Verfahrens sind in Abb. 4 dargestellt. Die Analyse wurde für einen Datensatz ohne Bauwerksgrundrisse im Datenbestand durchgeführt, so dass für jedes Bauwerk Grundrisse erkannt werden. In Abb. 4 (a) ist das Luftbild dargestellt und Abb. 4 (b) zeigt die gesamte 3D-Punktwolke. Die aus den Daten abgeleiteten Bauwerksgrundrisse mit den ermittelten Bauwerkshöhen werden in Abb. 4 (c) und 4 (d) im Gesamtkontext der vorhandenen Fernerkundungsdaten dargestellt.

Die Parameter für das Zusammenfügen von Umrisspolygonen sind konfigurierbar, um den Algorithmus an die Charakteristik der Datensätze anzupassen. Dicht bebaute Gebiete, wie sie oft in Innenstädten vorzufinden sind, erfordern geringe Abstandsschwellwerte für das Zusammenführen von Umrisspolygonen, da aneinander grenzende Bauwerke nicht zusammenhängend erkannt werden sollen. In Vorstadtregionen treten Bauwerke oft vereinzelt auf und haben zahlreiche Anbauten wie Garagen und Wintergärten. Aus diesem Grund ist das Zusammenführen von Umrisspolygonen von dicht beieinander liegenden Dachflächen erforderlich.

3.3 Verarbeitung von massiven LiDAR-Daten

Die erfassten LiDAR-Datensätze zeichnen sich durch ihre hohe Dichte von bis zu 100 Punkten/m² und der damit verbundenen Größe aus. Datensätze von einer erfassten Region beinhalten oft mehrere Milliarden Punkte und benötigen deshalb mehrere hundert Gigabyte Speicherplatz. Um diese Daten visualisieren, verwalten und effizient verarbeiten zu können sind Out-of-Core-Strategien erforderlich (RICHTER 2010). In einem Vorverarbeitungsschritt werden

die 3D-Punktwolken in eine räumliche Datenstruktur überführt (BARBER 2008). Diese Datenstruktur ermöglicht eine Verarbeitung unabhängig von der Größe des vorhandenen Hauptspeichers und ist lediglich durch die verfügbare Kapazität des externen Speichers (z. B. Festplatte) beschränkt.

Für das Auffinden von veränderten Bauwerken werden für jeden Bauwerksgrundriss die benötigten Daten aus der räumlichen Datenstruktur extrahiert und analysiert. Da die Anzahl und die Größe der Grundrisse in der Regel begrenzt ist, kann dieser Vorgang sequentiell für jedes Bauwerk auch für massive LiDAR-Daten effizient im Hinblick auf die Berechnungszeit durchgeführt werden.

Das Auffinden von neuen Bauwerken dauert aufgrund der Detektion von Flächen länger, so dass eine Reduktion der zu analysierenden 3D-Punktwolke bei massiven LiDAR-Daten erforderlich ist. Die Daten werden reduziert, indem bodennahe Punkte durch den Abgleich mit dem DGM sowie Punkte über bereits vorhandenen Bauwerksgrundrissen nicht analysiert werden. Besonders hochaufgelöste LiDAR-Daten können auf eine definierbare Genauigkeit reduziert werden, indem ein DSM mit einer festen Rastergröße aus den Daten abgeleitet wird, welches anschließend für die Analyse verwendet wird.

4 Aufbereitung der Ergebnisse

Die vorgestellten Verfahren zur Analyse von LiDAR-Daten wurden in ein Framework für die Visualisierung und Analyse massiver 3D-Punktclouds integriert, welches mit dem Ziel entwickelt wurde, verschiedene Geodaten für die Aufbereitung von 3D-Stadtmodellen zu visualisieren. Die gemeinsame Darstellung der Daten (DSM, DGM, 3D-Punktwolken, Luftbilder, 3D-Modelle, Bauwerksgrundrisse) ermöglicht eine Beurteilung und Abschätzung der Qualität und Aktualität von vorhanden und neu erfassten Daten. Die verschiedenen Datenquellen können in einer 3D-Darstellung exploriert und beliebig ein- und ausgeblendet sowie in ihrer Transparenz angepasst werden. Die durch die Analysen gefundenen Unterschiede zwischen dem Datenbestand und neu erfassten Datensätzen, die sich aufgrund von baulichen Veränderungen ergeben, werden aufbereitet und in die Visualisierung integriert (Abb. 2 (c) und Abb. 4 (c)). Alle Bereiche mit Veränderungen in der Bebauung können aus dem Gesamtdatenbestand extrahiert werden, so dass eine Aktualisierung des 3D-Stadtmodells durch 3D-Stadtmodellwerkzeuge vorgenommen werden kann.

5 Fazit

In dieser Arbeit wurde ein Verfahren zum Auffinden von Veränderungen in der Bebauung von Städten und Metropolregionen vorgestellt, das eine punktuelle Aktualisierung und Fortführung des entsprechenden 3D-Stadtmodells über ein Stadtmodell-CMS ermöglicht. Dabei werden mit dem Verfahren die lokal begrenzten einzelnen Änderungsbereiche automatisiert ermittelt, die dann mit Hilfe von spezialisierten Werkzeugen für die Konstruktion und Edition von 3D-Stadtmodellen weiterbearbeitet werden. Der Schwerpunkt dieser Arbeit lag auf der Erkennung und Visualisierung von Veränderungen der LiDAR-Daten im Gesamtkontext des vorhandenen Datenbestandes. Die ermittelten Unterschiede zum Datenbestand werden lokalisiert und aufbereitet, so dass durch die punktuelle Aktualisierung des 3D-Stadtmodells insbesondere eine aufwändige Neukonstruktion auf Basis des gesamten Datenbestandes vermieden werden kann.

6 Danksagung

Dieses Forschungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und ist Teil der InnoProfile Nachwuchsforschergruppe 3D-Geoinformationen (www.3dgi.de). Die verwendeten Datensätze wurden von virtualcitySYSTEMS zur Verfügung gestellt. Wir danken außerdem dem HPI-Bachelorprojektteam „Werkzeug zur 3D-Analyse virtueller Stadtmodelle“ für die Beiträge zur Implementierung.

7 Literaturverzeichnis

- AMERI, B., & FRITSCH, D., 2000: Automatic 3D building reconstruction using plane-roof structures. Proc. of ASPRS annual conference, S. 22-26.
- BARBER, D. M., HOLLAND, D. & MILLS, J.P., 2008: Change detection for topographic mapping using three-dimensional data structures. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, S. 1177-1182.
- CHENG, L., GONG, J., CHEN, X. & HAN, P., 2008: Building boundary extraction from high resolution imagery and lidar data International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, S. 693-698.
- DÖLLNER, J., BAUMANN, K. & HINRICHS, K., 2000: Texturing Techniques for Terrain Visualization. VIS '00: Proceedings of the conference on Visualization '00, S. 227-234.
- DORNINGER, P. & NOTHEGGER, C., 2007: 3D Segmentation of Unstructured Point Clouds for Building Modelling. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, S. 191-196.
- FRÜH, C., SAMMON, R. & ZAKHOR, A., 2004: Automated Texture Mapping of 3D City Models With Oblique Aerial Imagery. 3DPVT, S. 396-403.
- GRÖGER, G. & PLÜMER, L., 2009: Updating 3D city models: how to preserve geometric-topological consistency. Proceedings of the 17th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems, S. 532-535.
- HU, J., YOU, S. & NEUMANN, U., 2006: Integrating LiDAR, Aerial Image and Ground Images for Complete Urban Building Modeling. Third International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission, S. 184-191.
- LAFARGE, F., DESCOMBES, X., ZERUBIA, J. & PIERROT-DESEILLIGNY, M., 2010: Structural Approach for Building Reconstruction from a Single DSM. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, S. 135-147.
- RICHTER, R. & DÖLLNER, J., 2010: Out-of-Core Real-Time Visualization of Massive 3D Point Clouds. 7th International Conference on Virtual Reality, Computer Graphics, Visualisation and Interaction in Africa, to appear.
- TANNER, C. C. , MIGDAL, C. J. & JONES, M. T., 1998: The clipmap: a virtual mipmap. SIGGRAPH 98, S. 151-158.
- VOSSelman, G., GROTE, B.G.H., SITHOLE, G. & RABBANI, T., 2004: Recognising Structure in Laser Scanner Point Clouds. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, S. 33-38.
- ZHOU, Q. & NEUMANN, U., 2008: Fast and extensible building modeling from airborne LiDAR data. Proceedings of the 16th ACM SIGSPATIAL international conference on Advances in geographic information systems, S. 1-8.